

Problemy zrównoważonego użytkowania surowców mineralnych

Problems of Sustainable Use of Mineral Resources

Agnieszka Gałuszka, Zdzisław Migaszewski

*Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy Jana Kochanowskiego w Kielcach,
Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Instytut Chemii,
Zakład Geochemii i Ochrony Środowiska, ul. Świętokrzyska 15G, 25-406 Kielce,
e-mail: Agnieszka.Galuszka@ujk.kielce.pl; Zdzislaw.Migaszewski@ujk.kielce.pl*

Streszczenie

Surowce mineralne należą do nieodnawialnych zasobów przyrody. Ich ilość w skorupie ziemskiej jest ograniczona a regeneracja możliwa jedynie w specyficznych warunkach geologicznych oraz w czasie obejmującym setki, tysiące, a nawet miliony lat. Trwałość użytkowania surowców mineralnych zależy przede wszystkim od ochrony i racjonalnej gospodarki tymi zasobami przyrody, jednak w obliczu rosnącej liczby mieszkańców Ziemi, oszczędność ta tylko w niewielkim stopniu przyczyni się do zaspokojenia wzrastającego zapotrzebowania na surowce mineralne. W artykule przedstawiono metody, które służą przedłużeniu trwałości użytkowania surowców mineralnych oraz zasygnalizowano problemy, z jakimi może być związane wdrażanie zrównoważonej gospodarki surowcami mineralnymi.

Słowa kluczowe: surowce mineralne, zrównoważony rozwój, recykling, substytucja, biotechnologia

Abstract

Mineral raw materials belong to non-renewable resources. Their content in the Earth's crust is limited and they undergo regeneration only in specific geologic conditions during hundreds, thousands or even millions of years. The sustainable use of mineral resources depends mostly on their protection and efficient management. However, due to growing population on Earth, the economy will not fulfill an increasing demand for mineral resources. This article presents various methods of extending the future availability of mineral resources, as well as indicates some potential problems in implementation of sustainable management of mineral resources.

Key words: mineral resources, sustainable development, recycling, substitution, biotechnology

Wstęp

Surowce mineralne zapewniają wysoki standard życia współczesnych społeczeństw, gwarantując zaspokojenie zapotrzebowania na energię, materiały budowlane a także stanowiąc podstawę przemysłu i rozwoju technologicznego. Zrównoważony rozwój ma zapewnić możliwość przetrwania cywilizacji ludzkiej w obliczu zmniejszających się zasobów surowców nieodnawialnych (zwłaszcza energetycznych) oraz wzrastającej antropopresji i związanego z nią zanieczyszczenia środowiska przyrodniczego. Realizacja zrównoważonego rozwoju

nakłada na społeczeństwa obowiązki racjonalnego gospodarowania zasobami przyrody oraz zapewnienia bazy surowcowej, jak również odpowiedniej jakości środowiska przyrodniczego dla przyszłych pokoleń. Kozłowski za Goetlem (1997) podkreślił istotną rolę zapewnienia trwałości kopaliny¹ oraz

¹ Terminy kopaliny i surowce mineralne (lub pierwotne surowce mineralne) traktowane są przez wielu autorów jako synonimy. Niektórzy jednak pod pojęciem kopalina rozumieją substancję zawartą w złożu (np. wapień), natomiast termin surowiec mineralny traktują jako kopa-

zagwarantowania ochrony środowiska wokół miejsc eksploatacji i przeróbki kopalni w realizacji ochrony litosfery jako kluczowego zadania współczesnej cywilizacji.

Realizacja ekorozwoju na szczeblu rządowym polega na opracowaniu aktów prawnych i dokumentów, które wyznaczają kierunki działań służące zrównoważonemu rozwojowi. Przykładem takiego podejścia do zagadnienia trwałego wykorzystania surowców mineralnych jest obowiązująca w Unii Europejskiej strategia tematyczna w sprawie zrównoważonego wykorzystywania zasobów naturalnych². Dokument ten w szczególności zwraca uwagę na rolę technologii, które pozwolą na wzrost oszczędności surowców, poprzez zwiększenie efektywności ich pozyskiwania oraz przetwarzania w procesie produkcyjnym. Niemniej istotnym zadaniem jest według tej strategii „opracowanie i wdrożenie szerokiego zakresu instrumentów, obejmujących badania, transfer technologii, instrumenty rynkowe i ekonomiczne, programy najlepszych działań praktycznych oraz wskaźniki wydajności zasobów”.

W obecnych czasach coraz częściej stawiane są pytania o to, w jaki sposób współczesne społeczeństwa mogą zapobiec kryzysowi surowcowemu w przyszłości i czy jest to zadanie możliwe do wykonania. Podobnie jak w przypadku realizacji innych przesłanek ekorozwoju, zapewnienie trwałości kopalni wymaga pewnych wyrzeczeń, które prędzej, czy później będą musiały być podjęte przez społeczeństwa. Jednak im wcześniej racjonalne wykorzystanie zasobów przyrody stanie się powszechne, tym mniej dotkliwie odczują kryzys surowcowy przyszłe pokolenia.

Do najważniejszych zadań przemysłu wydobywczego należy problem ochrony złóż surowców mineralnych oraz związanego z nim stopnia wykorzystania oraz właściwego i komplementarnego ich zagospodarowania. Szczególnej ochronie podlegają złoża unikatowe w skali całego kraju, o wyjątkowej wartości użytkowej (np. surowców ilastych ceramiki szlachetnej, rud miedzi). Stopień wykorzystania złoża jest dość istotny w przypadku występowania w nim surowca zróżnicowanego jakościowo. W trudnych warunkach geologiczno-górnicych lub przy pełnej mechanizacji eksploatacji wybiera się często najlepsze partie złoża, pozostawiając partie ustępujące pod względem jakościowym. W niektórych przypadkach stopień jego wykorzystania nie przekracza 40%. Właściwe zagospodarowanie złoża polega na eksploatacji zgodnie z jego przeznaczeniem, na przykład złoża wapieni i piaskowców blocznych nie powinny być wykorzystywane do produkcji kruszywa łamanego. Pozyskiwanie kamieni blocznych nie wymaga stosowania dużej

ilości materiałów wybuchowych, co nie prowadzi do powstawania dodatkowych rozluźnień i spękań w złożu, a tym samym do jego dewastacji. Taki sposób podejścia nosi w sobie jeszcze dodatkowy aspekt praktyczny. Eksploatacja kamieni blocznych jest źródłem niewielkiej ilości odpadów, co w połączeniu z brakiem innych efektów ubocznych towarzyszących wybuchom (drgań górotworu, rozchodzenia się fal akustycznych, rozrzutu odłamków skał) czyni ją mniej uciążliwą dla środowiska przyrodniczego. Z innych przykładów niewłaściwego wykorzystywania złóż surowców mineralnych należy wymienić: złoża wapieni o wysokiej zawartości CaCO₃ (około 99%) do produkcji kruszywa łamanego, złoża ilów ceramiki szlachetnej do produkcji cegły budowlanej lub też złoża piasków szklarskich do produkcji zapraw murarskich lub tynków itp.

Komplementarne wykorzystanie złoża oznacza, że wraz z kopalnią główną powinny być eksploatowane kopaliny współwystępujące i towarzyszące, przy jednoczesnym dążeniu do bezodpadowego wykorzystania surowców mineralnych. Przykładem kopalni współwystępujących (nie dających się oddzielić od kopaliny głównej) są margle lub dolomity w wapieniach, węgle sapropelowe (kenele i boghedy) w obrębie węgla humusowych w pokładach węgla kamiennego itp. Kopaliny towarzyszące obejmują surowce chemiczne lub skalne, występujące w złożach węgla kamiennych (bentonity, ily bentonitowe, łupki ogniotrwałe), węgla brunatnych (surowce ilaste ceramiki szlachetnej i budowlanej, kruszywa naturalne) lub rud miedzi (anhydryt). Innym przykładem jest występowanie kopalni głównych i towarzyszących należących do grupy surowców skalnych – piasków kwarcowych z piaskami formierskimi oraz ilów i glin do produkcji ceramiki budowlanej i odpowiednio kruszywa lekkiego. W rudach metali występują często domieszki rzadkich pierwiastków i tak na przykład rudy miedzi zawierają ponad 40 pierwiastków śladowych, z których tylko nieliczne z uwagi na barierę technologiczną i ekonomiczną są odzyskiwane. W przypadku rud metali dużą rolę odgrywa też postęp techniczny w procesach ich przeróbki. Ważne jest dobranie takiego procesu technologicznego (dostosowanego do określonego minerału), który umożliwi przejście zbyt dużych ilości metalu do odpadów przerobczych.

Konieczne jest także poszukiwanie substytutów surowców mineralnych oraz maksymalizacja odzysku przez obieg zamknięty (recykling). Pewne nadzieje na uniezależnienie się społeczeństw od zasobów surowców nieodnawialnych dają nowe technologie, a wśród nich biotechnologie, jednak wizja świata, w którym zmodyfikowane genetycznie organizmy zaspokajają zapotrzebowanie na surowce mineralne wydaje się być jeszcze odległą w czasie.

linę przerobioną (np. kruszywo łamane wapienne) (Bolewski i in., 1990).

² Patrz strona UE: <http://www.europa.eu.int/comm/environment/natres/index.htm> (1.01.2008).

Pojęcie trwałości surowców mineralnych

Surowce mineralne zalicza się do nieodnawialnych zasobów środowiska przyrodniczego, czyli takich, których odtworzenie w ciągu trwania jednego pokolenia nie jest możliwe. Wynika to z faktu, że powstają one w wyniku różnych procesów geologicznych w określonym przedziale czasu. Wyjątkiem są współcześnie tworzące się nagromadzenia piasków i żwirów w korytach rzek i na wybrzeżach morskich, pokłady guana (fosforanów i azotanów wapnia, magnezu i amonu), soli kamiennej w salinach i lagunach morskich stref tropikalnych i subtropikalnych lub chlorków, boranów, azotanów, siarczanów w wysychających zbiornikach pustynnych, nagromadzeń siarki w kraterach czynnych wulkanów itp. Ze względu na rodzaj wykorzystania wyróżnia się cztery grupy złóż surowców mineralnych (Kozłowski, 1991; Przeniosło, 1996):

1. energetycznych (węgiel kamienny i brunatny, ropa naftowa, gaz ziemny, uran, łupki i piaski bitumiczne),
2. metalicznych (rudę metali),
3. chemicznych (sól kamienna, sole potasowo-magnezowe, siarka, baryt, fluoryt itp.)
4. skalnych (surowców budowlanych, ceramicznych itp.).

Należy jednak podkreślić, że często te same surowce znajdują zastosowanie w różnych gałęziach gospodarki, np. wapienie w budownictwie (kamienie bloczne, płyty dekoracyjne), w drogownictwie (kruszywo łamane), hutnictwie (topnik), w przemyśle cementowym i wapienniczym, przy odsiarczaniu gazów kominowych w elektrowniach węglowych, w rolnictwie do odkwaszania gleb itp.

Dla utrzymania wysokiego standardu życia obywateli krajów rozwiniętych i zapewnienia rozwoju ekonomicznego, kluczowe znaczenie mają surowce energetyczne oraz skalne. Umożliwiają one realizację najważniejszych potrzeb życiowych współczesnych społeczeństw – produkcję energii elektrycznej i ciepła oraz budowę domów, zakładów przemysłowych i obiektów użyteczności publicznej. Surowce te są jednocześnie najintensywniej eksploatowane, a ich recykling jest zwykle niemożliwy lub nieopłacalny. Wskaźniki tempa zużycia *per capita* dla większości surowców wzrastają o 1-3% rocznie (Legarth, 1996). Wśród surowców metalicznych najwięcej (powyżej 1 mln ton rocznie) zużywa się żelaza, glinu, miedzi, manganu, cynku, chromu, ołowiu, tytanu i niklu. Do surowców wykorzystywanych w najmniejszej ilości (<2500 t/rok) należą złoto, selen, tantal, platynowce, ind, gal, german, diamenty i skand (Wellmer, Becker-Platen, 2001). Surowce te w większości są wykorzystywane w przemyśle elektronicznym, stanowiącym podstawę nowoczesnych technologii.

Raport Klubu Rzymskiego „Granice wzrostu” (Meadows i in., 1972) jest prawdopodobnie najczęściej cytowanym przykładem prognozy globalnego

załamania gospodarki światowej w wyniku zużycia zasobów nieodnawialnych. Nie sposób nie docenić roli tej publikacji w budzeniu świadomości ekologicznej i w kształtowaniu idei zrównoważonego rozwoju świata. W prognozach dotyczących ilości dostępnych surowców mineralnych używa się wskaźnika ich żywotności (ang. *reserves life time, life index*), oznaczającego stosunek udokumentowanych zasobów danego surowca do jego obecnej konsumpcji w skali roku (Wellmer, Becker-Platen, 2002). Choć wskaźnik ten nie uwzględnia wielu istotnych czynników kształtujących wielkość wydobycia (np. dostępności zasobów, popytu na dany surowiec, kosztów eksploatacji itp.), to jednak umożliwia on wyznaczenie dotychczasowych trendów w konsumpcji surowców mineralnych oraz ułatwia prognozowanie przyszłych zmian. Jak pokazuje analiza wskaźników żywotności dla węgla, cynku, ołowiu, gazu ziemnego i ropy naftowej przedstawiona przez Wellmer i Becker-Platen (2002), na początku XXI wieku, jedynie w przypadku ropy naftowej, której wydobycie osiągnie szczyt między latami 2010–2020, są możliwe trafne prognozy. Współczesny rynek ropy naftowej dysponuje 1010 miliardami baryłek³, a biorąc pod uwagę możliwość dokonania nowych odkryć (szczególnie w strefach szelfu kontynentalnego i w regionach polarnych) i poprawiania efektywności wydobycia, może on wzrosnąć do 2000 miliardów (McLaren, 2005). Rocznie zużywa się około 30 miliardów baryłek ropy, przy czym jej zasobów wystarczy według prognoz na następne 35-70 lat. Biorąc pod uwagę silną ekspansję krajów intensywnie rozwijających się, takich jak Chiny czy Indie, zużywających coraz więcej surowców, prognozy te mogą być zbyt optymistyczne. Już dziś zwraca się uwagę na możliwość załamania się gospodarki USA i powstania licznych problemów społecznych w wyniku wzrostu cen tego surowca. Rekordowa cena 100\$ za baryłkę ropy padła na nowojorskiej giełdzie 2 stycznia 2008 roku, osiągając w III kwartale tego roku granicę 150\$. Według ekspertów finansowych, mimo okresowych spadków, będzie ona stale wzrastać.

Nieco większym optymizmem napawa sytuacja na rynku surowców metalicznych. Według zestawienia zawartego w Komunikacie Komisji do Rady i Parlamentu Europejskiego z 2003 roku⁴, nie ma obecnie podstaw do obaw, że w ciągu kilkudziesięciu lat dojdzie do całkowitego wyczerpania złóż rud metali w skali światowej. Dla poszczególnych metali stosunek udokumentowanych zasobów bilansowych do produkcji w 1999 roku wynosił: dla żelaza – 133 lata, cynku – 24 lata, ołowiu – 21 lat,

³ Baryłka – jednostka objętości w przemyśle naftowym. 1 baryłka = 42 galony amerykańskie = ~159 litrów.

⁴ Patrz: strona internetowa Ministerstwa Środowiska: http://www.mos.gov.pl/.../Towards_a_Thematic_Strategy_on_the_Sustainable_Use_of_Natural_Resources_ver_P_OL.pdf (1.01.2008).

miedzi – 27 lat, niklu – 44 lata, cyny – 49 lat oraz srebra – 16 lat. Cytowane szacunki uważa się za zaniżone w wyniku bezzasadnego zaniechania poszukiwań nowych złóż surowców mineralnych, poprawy wydajności wydobywania oraz recyklingu. Niemalą szansą na zwiększenie trwałości surowców metalicznych jest rozwój technologiczny, prowadzący do miniaturyzacji urządzeń, a co za tym idzie, zmniejszenia zużycia metali (Legarth, 1996).

Współczesne i nowe technologie poszukiwania i eksploatacji surowców mineralnych

Współcześnie w górnictwie stosuje się trzy metody eksploatacji kopalni: podziemną, odkrywkową i otworową. Najbardziej opłacalnym a jednocześnie najstarszym sposobem pozyskiwania surowców mineralnych jest metoda odkrywkowa. Nadaje się ona do złóż zalegających płytko, w Polsce jest obecnie stosowana przede wszystkim w eksploatacji węgla brunatnego, torfu oraz surowców skalnych (piasków, żwirów, glin, ilów, wapieni, dolomitów, piaskowców, granitów, bazaltów). Metodą podziemną pozyskuje się surowce mineralne z głęboko zalegających złóż. W Polsce ma ona zastosowanie do eksploatacji węgla kamiennego i rud metali. Ostatnia, otworowa metoda nadaje się do wydobywania surowców chemicznych (siarki, soli kamiennej) oraz węglowodorów (ropy naftowej, gazu ziemnego). Każdy z wymienionych rodzajów eksploatacji wywołuje zagrożenia dla środowiska przyrodniczego, do których należą przede wszystkim: zmiany stosunków wodnych, deformacje powierzchni ziemi, zanieczyszczenie wód i gleb oraz wytwarzanie znacznych ilości trudnych do zagospodarowania odpadów.

Metody odkrywkowa i podziemna są stosowane od początków rozwoju górnictwa i nic nie wskazuje na to, że należy się spodziewać rewolucyjnych zmian w technologii pozyskiwania surowców mineralnych w przyszłości. Dopóki złoża będą możliwe do eksploatacji, te tradycyjne metody będą stosowane. Nowoczesne technologie będą z pewnością wykorzystywane do zwiększenia zdolności wydobywczych kopalni, do eksploatacji złóż występujących na dużych głębokościach lub w strefach szelfu kontynentalnego i dna oceanów, automatyzacji procesu wydobywania kopalni, czy też do zmniejszenia uciążliwości dla środowiska. Wraz z wprowadzeniem zrównoważonego rozwoju w górnictwie, nowego znaczenia nabrały odpady pogórnictwa, które stały się źródłem wielu cennych surowców – jako tzw. złoża antropogeniczne (Nieć, 1999).

Przykładem nowego podejścia do eksploatacji surowców metalicznych jest możliwość pozyskiwania metali z koncentracji polimineralnych – nagromadzeń tlenków żelaza i manganu, występujących na dnie oceanów i wzbogaconych, w porównaniu z ich odpowiednikami ze środowisk lądowych, w wiele cennych pierwiastków śladowych (np. Au,

Co, Cu, Mo, Ni, Pt) (Tsujino, 2007). Konkrety o znaczeniu perspektywicznym, występują na głębokości do 5500 m, tworząc tzw. pola koncentryjne. Według Morgan (2000), najbogatsze z pól Clarion-Clipperton, znajdujące się w strefie przyrównikowej Oceanu Spokojnego, stwarza możliwość wydobywania około 7500 mln ton manganu, 340 mln ton niklu, 265 mln ton miedzi i 78 mln ton kobaltu.

Ze względów ekonomicznych nie podjęto dotąd eksploatacji podmorskiej rud metali, jednak prowadzone są badania służące poznaniu budowy geologicznej złóż, warunków ich występowania oraz możliwości eksploatacji i technicznego odzysku metali z koncentracji. Zwraca się też dużą uwagę na zapewnienie ochrony środowiska w trakcie potencjalnej eksploatacji, zwłaszcza na ocenę negatywnego oddziaływania na faunę bentosową.

Różne znaczenie eksploatacji podmorskiej ropy i gazu. W tym kontekście godnymi uwagi są perspektywy zastosowań ekstremofilnych mikroorganizmów do biodegradacji *in situ* potencjalnych zanieczyszczeń mórz i oceanów.

Całkiem futurystyczna wydaje się natomiast wizja pozyskiwania surowców z przestrzeni kosmicznej. Jednak w wielu ośrodkach naukowych prowadzi się badania służące ocenie perspektyw pozyskiwania metali szlachetnych (platyny, palladu, irydu), niklu, selenu, galu z asteroid znajdujących się w pobliżu Ziemi (Suslick, Machado, 2002).

W nowych technologiach upatruje się także nadziei na zmniejszenie kosztów odzysku metali z coraz uboższych rud (Tilton, 1996), jak również z odpadów mineralnych. Należy podkreślić, że wiele hałd i osadników zawierających odpady mineralne, w tym niskoprocentowe rudy metali, można zaliczyć do złóż antropogenicznych. Wraz z rozwojem postępu technologicznego w zakresie wydobywania i przeróbki rud metali, należy również spodziewać się poszerzenia zasobów niektórych złóż o zasoby uznane kiedyś za pozabilansowe. Zadaniem technologii na przyszłość jest także miniaturyzacja urządzeń i odkrywanie nowych metod substytucji. Dobrym przykładem jest ewolucja w telekomunikacji, na przykład zastępowanie miedzianych kabli światłowodami wykazało, że jest możliwa substytucja dzięki postępowi w technologii. Kolejnym krokiem naprzód jest uniezależnianie się od surowców poprzez bezprzewodowy przepływ informacji z użyciem na przykład fal radiowych.

Reasumując, rudy metali będą w dalszym ciągu wyznaczać „puls” postępu technicznego, chociaż należy się spodziewać dużych zmian jakościowych – wypierania „tradycyjnych” metali przez pierwiastki wchodzące w skład stopów o specjalnym zastosowaniu. Zapotrzebowanie na określone rudy będzie też kształtować pojawienie się nowych generacji tworzyw sztucznych, czy też większe wykorzystanie złomu żelaza i metali kolorowych (np. w Wielkiej Brytanii przekraczające niekiedy zużycie odpowiednich rud).

Biotechnologie

Wykorzystanie procesów biologicznych w przemyśle, daje duże nadzieje na odsunięcie w czasie, a według niektórych ekspertów na całkowitą eliminację problemu wyczerpywania się surowców nieodnawialnych. Spośród licznych zastosowań biotechnologii, tematycznego zagadnienia dotyczą biologiczne metody pozyskiwania metali z ubogich rud, odpadów, wód kopalnianych oraz zanieczyszczonych gleb i osadów (biogórnictwo i fitogórnictwo), jak również produkcja energii z biologicznych źródeł alternatywnych.

Biogórnictwo według Rawlingsa i in. (2003) to „wykorzystanie mikroorganizmów do ługowania metali z rud siarczokowych i ich koncentratów”. Technologia biogórnictwa polega na mikrobiologicznym utlenieniu żelaza(II) i siarki w złożach siarczoków. Produktami tego utleniania są żelazo(III) i kwas siarkowy(VI). W środowisku wodnym wymienione substancje przyczyniają się do powstania rozpuszczalnych siarczanów(VI) metali (np. cynku, niklu, miedzi), które mogą być odzyskiwane z roztworów na drodze elektrochemicznej (Gałuszka, 2005). Do mikroorganizmów, które wykorzystuje się w biogórnictwie należą głównie bakterie i archeobakterie oraz niektóre grzyby i glony. W większości są one chemolitoautotroficzne i tolerują niskie pH (acidofile i ekstremalne acidofile) oraz wysokie temperatury (termofile). Te ostatnie znalazły również zastosowanie w bardziej wydajnych procesach biotechnologicznych wymagających wysokich temperatur. Do technologii biogórnictwa zalicza się również biooksydację, która polega na utlenianiu składników matrycy mineralnej lub skalnej podczas pozyskiwania metali szlachetnych, np. w przypadku złota technologię biogórnictwa stosuje się do usunięcia pirytu lub arsenopirytu.

Biogórnictwo jest bardzo wydajnym procesem. Dzięki tej biotechnologii można odzyskać od 40% (srebro) do 99% (cynk) metalu z substratu. Biorąc pod uwagę obecną rynkową cenę metali, najbardziej opłacalne jest biogórnictwo pozyskiwanie miedzi z chalkopirytu, dające odzysk do 97% tego surowca (Hallberg, Lindstrom, 1994). Szacuje się, że około 20% światowej produkcji miedzi pochodzi z biogórnictwa, w czym przoduje Chile z 10% udziałem tej biotechnologii w wydobyciu metalu (Corfield, 2006).

Technologia biogórnictwa stwarza możliwość wykorzystywania rud gorszej jakości, które były dotąd gromadzone jako odpady, lub też bogate w metale pyły przemysłowe (w takim przypadku dodatkową korzyścią jest zmniejszenie szkodliwości pyłów przemysłowych jako odpadów). Stosowanie tej biotechnologii chroni środowisko przyrodnicze przed negatywnym wpływem działalności górnictwej, zwłaszcza przed zanieczyszczeniem gleb i wód metalami oraz przed zakwaszeniem wód

kopalnianych (z ang. *Acid Mine Drainage*). W porównaniu z tradycyjnym pozyskiwaniem metali, biogórnictwo daje także pośrednie korzyści, a zwłaszcza oszczędność energii (surowców energetycznych), ponieważ proces technologiczny nie tylko nie wymaga zewnętrznych źródeł energii, lecz sam jest źródłem energii generowanej w trakcie reakcji utleniania. Jako przykład może służyć piryt, którego utlenianie jest procesem silnie egzotermicznym, wytwarzającym około 1500 kJ ciepła z 1 mola FeS_2 (Cathles, Apps, 1975; Migaszewski, Gałuszka, 2007).

Podobną do mikroorganizmów rolę w wydobywaniu metali mogą pełnić rośliny wyższe zaliczane do grupy hiperakumulatorów, czyli roślin, które akumulują wybrane pierwiastki w biomacie. Po raz pierwszy zwrócono uwagę na możliwość użycia hiperakumulatorów w fitogórnictwie w 1983 roku w Stanach Zjednoczonych (Anderson i in., 1999), a twórcy tej koncepcji (R.L. Chaney, J.S. Angle, A.J.M. Baker i J.M. Li) uzyskali w 1989 roku patent: „Metoda biogórnictwa niklu, kobaltu i innych metali z gleby”. Fitogórnictwo polega na sadzeniu lub wysiewaniu hiperakumulatorów na glebach wysoko zmineralizowanych lub terenach pogórnicznych. Plon uzyskiwany w ten sposób, nazywany „biorudą” (z ang. *bio-ore*), zbiera się po zakończeniu sezonu wegetacyjnego lub w sezonowym wykaszaniu. Fitogórnictwo może być prowadzone w warunkach naturalnych lub być wspomagane poprzez dodatek nawozów i/lub związków kompleksujących (np. EDTA).

Fitogórnictwo pozwala na pozyskiwanie metali zgromadzonych na hałdach pogórnicznych, które nie nadają się ze względów ekonomicznych do eksploatacji, a jednocześnie mogą stanowić zagrożenie dla środowiska przyrodniczego. Mała popularność tej technologii wynika z niskich cen metali na rynku światowym oraz uciążliwości zabiegów agrotechnicznych. Metody fitogórnictwa były dotychczas wykorzystywane głównie w badaniach laboratoryjnych (np. Nedelkoska, Doran, 2000).

Największym zainteresowaniem współczesnej biotechnologii cieszy się poszukiwanie alternatywnych źródeł energii. Biotechnologiczna produkcja energii polega na wykorzystaniu pierwiastka węgla zasymilowanego przez rośliny w procesie fotosyntezy i jego konwersji do bioetanolu czy innych biopaliw. Przykładem biotechnologicznego otrzymywania energii jest wytwarzanie etanolu z ziaren kukurydzy. Produkcja bioetanolu z tego źródła w USA w 2004 roku kształtowała się na poziomie około 12 milionów m^3 (McLaren, 2005) a 2006 roku w osiągnęła około 18 milionów m^3 (Angenent, 2007). Tak znaczny wzrost był możliwy dzięki modyfikacjom genetycznym, m.in., wprowadzeniu do genomu kukurydzy genu z bakterii glebowej *Bacillus thuringensis*, kodującego białko uodparniające rośliny na ich owadziego szkodnika omacnicę prosowiankę. Inne modyfikacje genetyczne,

prowadzące do zwiększenia ilości skrobi, zmniejszenia ilości błonnika, poprawienia stosunku ilościowego amylozy do amylopektyny, ułatwiłyby proces technologicznej produkcji etanolu i wpłynęłyby na znaczny wzrost jego wydajności (McLaren, 2005). Mimo zainteresowania biotechnologicznymi metodami produkcji energii, należy zwrócić uwagę na możliwość wystąpienia nieprzewidywalnych w skutkach zaburzeń w ekosystemach, jakie mogą nastąpić pod wpływem modyfikacji genetycznych roślin uprawnych, jak choćby eliminacja z sieci pokarmowych szkodników owadów, stanowiących pokarm owadożerców. Między innymi z tych obaw rodzi się niepewna przyszłość i niechęć do biotechnologicznego rynku energii. Kolejnym problemem związanym z biopaliwami jest opłacalność ich produkcji. Według raportu OECD z 2008 roku, pomimo wysokich cen ropy naftowej, koszty produkcji biopaliw w porównaniu z benzyną są w większości krajów wyższe. Zaskakująco niska jest też ich skuteczność ograniczania emisji CO₂. Niepokój budzi również twierdzenie, że duży popyt na biopaliwa spowodował szybki wzrost cen żywności, poprzez kurczenie się arealu upraw dla przemysłu rolno-spożywczego. Nie bez znaczenia są również dwa dodatkowe aspekty biotechnologicznego rynku energii: globalny (efekt cieplarniany) i przyrodniczy (degradacja naturalnych ekosystemów). Uprawa roślin energetycznych na obszarach wyciętych lasów, w których rośliny i gleby wiążą znaczne ilości CO₂, jest przedsięwzięciem nieopłacalnym. Według organizacji Nature Conservancy (zespół Joe Fargioniego), straty przewyższają zyski 17–423 razy. Do produkcji biopaliw nadają się tylko odpady roślin uprawnych, natomiast w przypadku nieużytków przyroda więcej zyska jeśli zasadzi się na nich las.

Recykling i substytucja – nadzieje i ograniczenia

Terminem recykling określa się powtórne wprowadzenie do obiegu surowca niezużytego w procesie syntezy lub wykorzystanie produktów ubocznych jako surowców w innych procesach technologicznych (np. wodorotlenku sodu do usuwania związków siarki w produktach naftowych), jak również uzdatnianie odpadów (np. wodorotlenków sodu i potasu do neutralizacji kwaśnych odpadów) lub odzyskiwanie energii (Migaszewski, Gałuszka, 2007). Do najczęściej odzyskiwanych materiałów należą zużyte produkty naftowe (smary i płyny hydrauliczne), baterie i akumulatory. Stosowanie recyklingu jest bardzo korzystne, ponieważ pozwala na oszczędność surowców, jak również zmniejszenie objętości, a często i toksyczności odpadów. Niestety nie każdy materiał może być poddany recyklingowi. Według Ayres'a (1994), surowce nieodnawialne można podzielić na trzy grupy pod względem opłacalności i trudności technicznej ich recyklingu. Do pierwszej grupy należą metale sto-

sowane w przemyśle oraz katalizie, których odzysk sięga 25-50%. Drugą z grup stanowią opakowania, rozpuszczalniki, których recykling jest technicznie możliwy, lecz ekonomicznie nieopłacalny. Większość nieodnawialnych zasobów należy do grupy trzeciej, której recykling jest nieopłacalny i technicznie uciążliwy, np. składniki barwników, pestycydów, środków wybuchowych itp. Niestety większość surowców nieodnawialnych znajduje się w trzeciej grupie.

Słabą stroną recyklingu jest także niemożność pełnego odzysku substancji. W niektórych gałęziach przemysłu wymagane są substraty o dużej czystości, które znacznie łatwiej jest otrzymać z rudy niż na drodze odzysku (Wellmer, Becker-Platen, 2002). Odzysk materiałów wiąże się zwykle z pogorszeniem ich jakości (za wyjątkiem nielicznych przypadków, np. butelek polietylenowych). Innym rodzajem niedogodności związanej z możliwością recyklingu jest wysoka trwałość produktów, co stwarza problemy z pozyskaniem materiału do odzysku surowców (van Berkel, 2007).

Substytucja, czyli zastępowanie surowców nieodnawialnych odnawialnymi dotyczy głównie surowców energetycznych (Chen, 2006). Styl życia mieszkańców krajów wysoko rozwiniętych jest bardzo energochłonny i mimo, że skupiają one tylko 25% populacji, to konsumują ponad 75% energii produkowanej na świecie w skali roku (cyt. za Dincer, 2000). Substytucja materiałów wydaje się być dobrym rozwiązaniem w stosunku do malejących rezerw surowców nieodnawialnych. Przykładem jej jest omawiane w niniejszym artykule zastępowanie benzyny biopaliwami lub węgla odnawialnymi źródłami energii (energiami geotermalną, wiatru, wody, słońca itp.).

Rozważając inne problemy związane z substytucją, należy zwrócić uwagę na fakt, że nie dla wszystkich znanych materiałów, produkowanych z surowców nieodnawialnych znane są odnawialne substytuty. Niektórzy autorzy (np. Huesemann, 2003) dostrzegają dodatkowo istotne ekonomiczne przyczyny współczesnej nieopłacalności substytucji ze względu na „sztuczne” utrzymywanie niskich cen surowców nieodnawialnych poprzez subsydia i eksternalizację kosztów.

Podsumowanie

Jak wykazano w niniejszej publikacji, problematyka przedłużenia trwałości surowców mineralnych jest przedmiotem rozważań na płaszczyźnie społeczno-prawnej, przyrodniczej, ekonomicznej i technologicznej. Zainteresowanie specjalistów z różnych dziedzin omówionym zagadnieniem stawia je wśród najważniejszych problemów współczesnej cywilizacji.

Według autorów przyszłość górnictwa można podzielić na dwa etapy: w pierwszym nadal dominować będą tradycyjne metody eksploatacji surow-

ców mineralnych, w połączeniu ze wzrostem efektywności wydobywania w miarę postępu technologicznego. Trwałość surowców według zasad zrównoważonego rozwoju będzie wspierana poprzez nowe technologie, charakteryzujące się minimalnym zużyciem surowców mineralnych, wody i energii, jak również przez recykling i substytucję. Większy też będzie udział alternatywnych źródeł energii w ogólnym bilansie energetycznym poszczególnych krajów. Okres ten może trwać przez kolejne kilkadziesiąt do kilkuset lat, w zależności od popytu na określone rodzaje surowców i ich dostępność. Kolejny etap będzie związany z eksploatacją złóż występujących na dnie oceanów oraz w kosmosie (planetach, księżycach i asteroidach). Ze względu na nieodnawialność surowców mineralnych przyszłe pokolenia zaczną odczuwać ich deficyt aż do zupełnego wyczerpania złóż. Nadzieją napawa postęp technologiczny, który być może całkowicie uniezależni cywilizację ludzką od nieodnawialnych zasobów środowiska. Przytaczając słowa byłego saudyjskiego Ministra Ropy Naftowej i Surowców Mineralnych, Ahmeda Zaki Yamaniego: „Epoka kamienia łupanego nie skończyła się z powodu braku kamieni, a epoka ropy naftowej skończy się długo przed tym, gdy na świecie skończy się ropa”, można się zastanawiać, czy dzięki nowym technologiom nasza przyszłość może uniezależnić przyszłe pokolenia od strategicznych surowców? Niezależnie od odpowiedzi na to pytanie, warto poszukiwać różnych dróg, które doprowadzą cywilizację człowieka do bezpiecznej i zrównoważonej przyszłości.

Literatura

- ANDERSON C.W.N., BROOKS R.R., CHIARUCCI A., LACOSTE C.J., LEBLANC M., ROBINSON B.H., SIMCOCK R., STEWART R.B., 1999, Phytomining for nickel, thallium and gold, w: *Journal of Geochemical Exploration*, no 67, s. 407-415.
- ANGENENT L.T., 2007, Energy biotechnology: beyond the general lignocellulose-to-ethanol pathway, w: *Current Opinion in Biotechnology*, no 18, s. 191-192.
- AYRES R.U., Industrial metabolism: theory and policy, w: *The greening of industrial ecosystems*, red. Allenby B.R., Richards D.J., National Academy Press, Washington D.C. 1994, pp. 23-37.
- BOLEWSKI A., GRUSZCZYK H., GRUSZCZYK E., *Zarys gospodarki surowcami mineralnymi*, Wyd. Geol. Warszawa 1990.
- CATHLES L.M., APPS J. A., 1975, A model of the dump leaching process that incorporates oxygen balance, heat balance, and air convection, w: *Metallurgical Transactions B*, no 6B, s. 617-624.
- CHEN CH., 2006, Development of a framework for sustainable uses of resources: More paper and less plastics?, w: *Environment International*, no 32, s. 478-486.
- CORFIELD R., 2006, Bugs banquet, w: *Chemistry & Industry*, no 23, s. 23-25.
- DINCER I., 2000, Renewable energy and sustainable development: a crucial review, w: *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, no 4, s. 157-175.
- GAŁUSZKA A., 2005, Wykorzystanie mikroorganizmów i roślin do pozyskiwania metali, w: *Przegląd Geologiczny*, vol 53, no 10/1, s. 858-862.
- HALLBERG K.B., LINDSTROM E.B., 1994, Characterization of *Thiobacillus caldus* sp. Nov., a moderately thermophilic acidophile, w: *Microbiology*, no 140, s. 3451-3456.
- HUESEMANN M.H., 2003, The limits of technological solutions to sustainable development, w: *Clean Techn. Environ. Policy*, no 5, s. 21-34.
- KOMUNIKAT KOMISJI DO RADY I PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO: *W kierunku strategii tematycznej na temat zrównoważonego wykorzystywania zasobów naturalnych*, 2003 - <http://www.europa.eu.int/comm/environment/natres/index.htm> (1.01.2008).
- KOZŁOWSKI S., *Gospodarka a środowisko przyrodnicze*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 1991.
- KOZŁOWSKI S., *Druga droga do ekorożwoju*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 1997.
- LEGARTH J.B., 1996, Sustainable metal resource management – the need for industrial development: efficiency improvement demands on metal resource management to enable a (sustainable) supply until 2050, w: *J. Cleaner Prod.*, vol. 4, no 2, s. 97-104.
- MCLAREN J.S., 2005, Crop biotechnology provides an opportunity to develop a sustainable future, w: *Trends in Biotechnology*, vol. 23, no 7, s. 339-342.
- MEADOWS D.H., MEADOWS D.L., RANDERS J., BEHRENS W.W., *The Limits to Growth*, Universe Books, New York 1972.
- MIGASZEWSKI Z.M., GAŁUSZKA A., *Podstawy geochemii środowiska*, WNT, Warszawa 2007.
- MORGAN C.L., Resource estimates of the Clarion-Clipperton manganese nodule deposits, w: red. Cronan D.S., *Handbook of marine mineral deposits*, CRC Press, Boca Raton, 2000, s.145-170.
- NEDELKOSKA T.V., DORAN P.M., 2000, Characteristics of heavy metal uptake by plant species with potential for phytoremediation and phytomining, w: *Minerals Engineering*, vol. 15, no 5, s. 549-561.

21. NIEĆ M., 1999, Złoza antropogeniczne, w: *Przegląd Geologiczny*, vol. 47, no 1. s. 93-98.
22. OECD REPORT, *Biofuel Support Policies: An Economic Assessment*, OECD Publishing, Paris 2008.
23. Red. PRZENIOSŁO S., *Mineral Resources of Poland 1995*, Państw. Inst. Geol. Warszawa 1996.
24. RAWLINGS D.E., DEW D., DU PLESIIS C., 2003, Biomineralization of metal-containing ores and concentrates, w: *Trends in Biotechnology*, no 21, s. 38-44.
25. *Strategia tematyczna w sprawie zrównoważonego wykorzystywania zasobów naturalnych*, 2007, <http://www.europa.eu.int/comm/environment/natres/index.htm> (1.01.2008).
26. SUSLICK S.B., MACHADO I.F., Non-renewable resources, w: red. Cilek V., *Natural Resources Policy and Management, Encyclopedia of Life Support Systems*, Oxford UK, UNESCO/EOLSS Publishers Co. 2002, s. 363-381.
27. TILTON J.E., 1996, Exhaustible resources and sustainable development. Two different paradigms, w: *Resources Policy*, vol. 22, no 1/2, s. 91-97.
28. TSUJINO T., 2007, Exploration technologies for the utilization of ocean floor resources – contribution to the investigation for the delineation of continental shelf, w: *Science & Technology Trends, Quarterly Review*, no 24, s. 68-80.
29. VAN BERKEL R., 2007, Eco-efficiency in primary metals production: Context, perspectives and methods, w: *Resources Conservation & Recycling*, no 51, s. 511-540.
30. WELLMER F-W., BECKER-PLATEN J.D., Global nonfuel mineral resources and sustainability, w: red. Briskey J.A., Schulz K.J., *Proceedings of 31st International Geological Congress Workshop on Deposit Modeling, Mineral Resource Assessment, and their role in Sustainable Development*, USGS Circular. 2001.
31. WELLMER F-W., BECKER-PLATEN J.D., 2002, Sustainable development and the exploitation of mineral and energy resources: a review, w: *Int. J. Earth Sci.*, no 91, s. 723-745.